

液晶透镜无偏振片成像的优化算法

白一晨¹, 陈晓西¹, 曾俊², 叶茂^{1*}

¹电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 610054;

²微晶景泰科技有限公司, 四川 成都 610000

摘要 液晶透镜因其无机械移动就可以实现对焦的优势, 有望应用在机器人视觉、自动驾驶、深度测量等技术领域。在液晶透镜视觉成像系统中, 为了不使用偏振片就可以获得高对比度的图像, 提出一种优化的无偏振片成像算法。图像边缘体现图像的主要轮廓信息, 边缘决定图像的对比度, 所以此算法提取图像边缘, 在边缘部分利用获取的非对焦图像和对焦图像进行图像处理, 平滑区域不作处理, 去除由非调制的寻常光带来的低频图像分量, 提高图像边缘对比度, 同时抑制平滑区域噪声的增加。实验证明, 优化后的算法增强了图像边缘的对比度, 相比于优化前的算法, 图像噪声下降了 50%。

关键词 视觉成像; 液晶透镜; 无偏振片成像; 图像去噪

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0815015

An Optimization Algorithm for Polarizer-Free Imaging of Liquid Crystal Lens

Bai Yichen¹, Chen Xiaoxi¹, Zeng Jun², Ye Mao^{1*}

¹ School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

² Micro LCL Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000, China

Abstract Owing to its ability of focus change not relying on any mechanical movements, liquid crystal lens is expected to be used in many fields such as robot vision, automatic pilot, and depth measurement. In the liquid crystal lens vision imaging system, in order to obtain high-contrast images without a polarizer, an optimization algorithm for polarizer-free imaging of liquid crystal lens is proposed. Image edge reflects the main contour information, and it decides the contrast of the image, so in the algorithm image edge is extracted first, then image processing is carried out with out-of-focus image and in-focus image in the edge parts, but not in the smooth area. Low frequency components caused by non-modulated ordinary wave are removed to improve image edge contrast and suppress noise in the smooth area. Experiments show that the optimized algorithm enhances the contrast of image edges, and the image noise is reduced by 50% compared with the algorithm before optimization.

Key words visual imaging; liquid crystal lens; polarizer-free imaging; image denoising

OCIS codes 100.3008; 110.4280; 150.0155; 230.3720

1 引 言

图像作为视觉信息的主要载体, 是人类从客观世界获取信息的重要来源。日常生活中的手机相机、数码相机, 及摄像监控设备、空间光学遥感设备等成像系统, 都是获取图像信息的重要工具。视觉成像系统已广泛应用于工业、医学、军事等领域, 大多数成像系统对不同距离的物体成像时, 需要通过

透镜的机械移动来实现对焦。在许多应用中, 为了减少透镜的机械移动, 研究人员提出了各种电控调焦的光学透镜, 如液体透镜^[1-3]及液晶透镜^[4-7]。电控调焦的光学透镜的成像原理与动物及人类的视觉成像机制相似。通过改变曲率或折射率分布来改变焦距从而实现对焦。液晶透镜视觉成像系统已实现对焦^[8-9]、变焦^[10-11]、深度测量^[12-13]等功能, 有望应用于工厂自动化、机器人视觉、自动驾驶、安防等领域。

收稿日期: 2018-04-02; 修回日期: 2018-04-27; 录用日期: 2018-05-08

基金项目: 四川省科技计划(2017JY0022)、中央高校基本科研业务费(ZYGX2016J076, ZYGX2010J063)

* E-mail: mao_ye@uestc.edu.cn

液晶透镜相比于玻璃或者塑料透镜,具有轻薄、寿命长和功耗低等优势。但是,在液晶透镜成像过程中,寻常光(o光)不被调制,引起图像对比度的降低。液晶透镜成像系统中通常使用偏振片,只让非寻常光(e光)进入系统。然而,偏振片会大幅度降低光通量,降低图像质量。

已有的无偏振片液晶透镜成像技术主要有以下几种。一种是采用蓝相液晶^[14-16]代替向列型液晶制备液晶透镜。然而,蓝相液晶有双折射效应小、温度范围窄、驱动电压高等缺点,尚未达到实用水平。另一种是使用多层液晶代替单层液晶,o光和e光分别由不同的液晶层调制^[17-19]。但是多层液晶结构的透镜有制作工艺复杂、成本高、厚度增加的缺点。最近,本课题组提出一种无偏振片成像技术(Polarizer-free imaging, PFI),不使用偏振片仍然能够有效去除未被调制的o光分量。PFI技术使用对焦图像和非对焦图像进行图像处理,提高图像的对比度^[20-21]。然而图像处理会增加图像噪声。PFI处理后通常还需要进行去噪^[22]。图像的锐度主要体现在边缘的对比度,因此本文提出优化算法,只针对图像边缘采用PFI。实验证明,优化后的算法能提高图像边缘的对比度,并抑制图像噪声的增加。

2 优化的无偏振片成像原理及算法

液晶透镜视觉成像系统结构如图1所示。液晶透镜放置在由玻璃透镜和图像传感器组成的相机模组之前。液晶材料中,有效折射率为

$$\frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \theta + n_o^2 \cos^2 \theta}},$$

其中 n_o 和 n_e 分别为寻常光

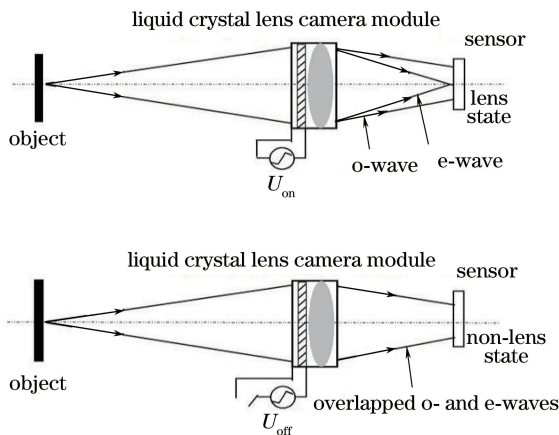


图1 液晶透镜视觉成像系统实验装置

Fig. 1 Experimental setup of the liquid crystal lens visual imaging system

的折射率和非寻常光折射率, θ 为液晶分子倾角。作用于液晶层的电场改变时,倾角 θ 发生旋转,非寻常光的折射率随之改变,e光受到调制而o光未被调制。如果液晶透镜成像系统中无偏振片,被调制的e光和未被调制的o光都会通过模组中的透镜入射到图像传感器上。改变电压,使被调制的e光对焦在图像传感器上,未被调制的o光在像面上会呈现离焦模糊斑,定义此时获取的图像为对焦图像 I_f 。为了尽可能减少由o光造成的图像低频分量,增强图像的对比度,引入另外一幅非对焦图像 I_r 作为参考图, I_r 中e光并未完全对焦。 I_f 和 I_r 都可以视为由o光和e光图像叠加在一起的图像^[20-21],即

$$I_f = I_f^e + I_f^o, \quad (1)$$

$$I_r = I_r^e + I_r^o, \quad (2)$$

式中: I_f^e 表示 I_f 中e光分量; I_f^o 表示 I_f 中o光分量; I_r^e 表示 I_r 中e光分量; I_r^o 表示 I_r 中o光分量。因为o光在 I_f 和 I_r 中都不被液晶透镜调制,所以 $I_f^o = I_r^o$ 。将 I_f 和 I_r 进行图像相减可降低o光分量,获得对比度增强图像 I_s ,

$$I_s = \frac{I_f - \alpha I_r}{1 - \alpha}, \quad (3)$$

式中, α 为可变参数,满足 $0 < \alpha < 1$ 。分母 $1 - \alpha$ 是为了保持 I_s 的亮度与 I_f 和 I_r 亮度一致。将(1)式和(2)式代入(3)式得到

$$I_s = \left(\frac{1}{1 - \alpha} I_f^e + I_f^o \right) - \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_r^e. \quad (4)$$

假设图像 $I' = \frac{1}{1 - \alpha} I_f^e + I_f^o$, I' 中光分量高于 $I_f = I_f^e + I_f^o$ 中e光分量(因为 $\frac{1}{1 - \alpha} > 1$),因此 I' 的对比度高于 I_f 。当 α 大于某一特定值时,图像 I_r^e 会比 I' 更加模糊。那么 $I' - \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_r^e$ 相当于对 I' 进行高通滤波,因此图像 I_s 的对比度高于 I' 。 α 越大,非对焦图像 I_r 的对比度越低,高通滤波效果越强, I_s 的对比度越高。

PFI算法在提高对比度的同时,在平滑区域引入了不必要的噪声。图像的对比度主要体现在图像边缘部分。灰度图像的边缘一般是图像的灰度发生剧烈变化之处^[23]。机器视觉的大多数应用都涉及图像边缘检测、图像滤波以降低噪声等。优化后的算法首先对 I_f 进行标准差滤波提取图像边缘。然后根据(3)式在边缘位置无偏振片成像得到图像 I_s' 。

3 噪声分析及三步去噪算法

3.1 无偏振片成像的噪声分析

无偏振片成像算法产生一个高对比度的图像 I_s 。但是随着 α 的增大,噪声也越大。假设 I_f, I_r, I_s 的噪声分别为 N_f, N_r, N_s 且噪声相互独立,根据(3)式 N_s 标准差为^[22]

$$D(N_s) = \left(\frac{1}{1-\alpha}\right)^2 D(N_f) + \left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)^2 D(N_r). \quad (5)$$

假设 $D(N_f) = D(N_r)$, 即 I_f 的噪声标准差与 I_r 的噪声标准差相等, 则 $D(N_s)$ 和 $D(N_f)$ 的关系为

$$D(N_s) = \frac{1+\alpha^2}{(1-\alpha)^2} D(N_f), \quad (6)$$

由(6)式分析可知, $\sqrt{D(N_s)}$ 随着 α 的增加而增加。实验发现, 当 α 超过 0.6, 噪声水平显著提高。因此需要有效的去噪方法来去除无偏振片成像带来的噪声。

3.2 三步去噪算法

3.2.1 提取显著噪声及图像边缘

根据(3)式, 噪声和图像边缘的位置与 I_r 及 I_f 密切相关。 I_r 及 I_f 在平滑区域灰度值基本一致, 在边缘有较大的差距。设置阈值 t_m 并获取二值图像 I_m 以此来确定随机噪声和边缘的位置^[22]。 I_m 如图 2(a)所示, 可表示为

$$I_m = \begin{cases} 1, & |I_f - I_r| > t_m \\ 0, & |I_f - I_r| \leq t_m \end{cases}. \quad (7)$$

为了区分显著噪声及图像边缘, 使用(8)式检测离散的噪声位置,

$$I_n^1(p) = \begin{cases} 1, & I_m(p) = 1 \cap \sum_{q \in N_{s_1}(p)} I_m(p) < t_1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (8)$$

其中 t_1 为阈值, p, q 为对应像素, $N_{s_1}(p)$ 表示以 p 点为中心, s_1 大小的邻域。第一次二值图像边缘位置表示为

$$I_e^1 = I_m - I_n^1, \quad (9)$$

I_e^1 如图 2(b)所示, 仍有一些显著噪声未被检测到。使用第二次噪声检测,

$$I_e^2 = \text{erode}[\text{dilate}(I_e^1)], \quad (10)$$

$$I_n^2(p) = \begin{cases} 1, & I_e^2(p) = 1 \cap \sum_{q \in N_{s_2}(p)} I_e^2(p) < t_2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (11)$$

$$I_n = I_n^1 \cup I_n^2, \quad (12)$$

$$I_c = I_m - I_n. \quad (13)$$

如(10)~(13)式所示。对图像 I_e^1 进行先膨胀后腐蚀的闭操作, 此操作保留孤立的噪声点, 同时平滑边缘。所选膨胀及腐蚀运算的结构元均为矩形结构元。(11)式为第二次检测图像 I_e^2 中的显著噪声, 设置阈值 $t_1 < t_2$, 邻域大小 $s_1 < s_2$ 。最终的显著噪声位置由(12)式给出。图像 I_n 及 I_c 如图 2(c)和(d)所示。对比图 2(b)和(d)可知, 保留的少许噪声点已经成功从图像 I_e^1 中移除, 最终去噪后的边缘图像 I_c 如图 2(d)所示。

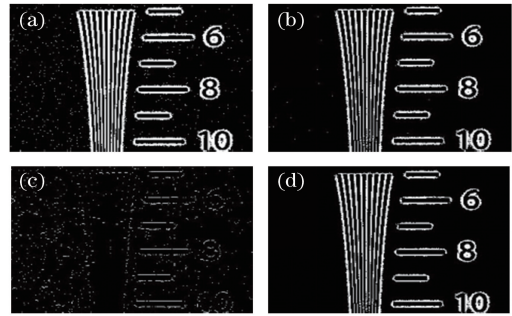


图 2 显著噪声及图像边缘。(a) I_m ; (b) I_e^1 ; (c) I_n ; (d) I_c

Fig. 2 Illustration of salient noises and image edges.

(a) I_m ; (b) I_e^1 ; (c) I_n ; (d) I_c

3.2.2 平滑区域及图像边缘去噪

通过(12)式确定噪声位置, 移除噪声并填入邻近非噪声的像素值,

$$I'_s(p) = \begin{cases} \sum_{q|q \in N_s(p) \cap I_n(q) \neq 1} \omega_q I_s(q), & I_n(p) = 1 \\ I_s(p), & I_n(p) = 0 \end{cases}, \quad (14)$$

式中: s 表示以像素点 q 为中心像素的邻域窗口; ω_q 表示权重系数, 一般选用 Gauss 权值^[22]。

图像 I_c 确定 I_s 中边缘的位置, 对图像 I_s 中平滑区域去噪, 为了防止对边缘滤波, 先对边缘图像 I_c 膨胀处理,

$$I_e^1 = \text{dilate}(I_c, s), \quad (15)$$

$$I''_s(p) = \begin{cases} \sum_{q|q \in N_s(p)} \omega_q I'_s(q), & I_n(p) = 1 \\ I'_s(p), & I_n(p) = 1 \end{cases}, \quad (16)$$

式中的 s 表示相同的邻域窗口。

最后, 对图像 I_s 边缘去噪, 并进行滤波:

$$I_{dn}(p) = \begin{cases} \sum_{q|q \in N_s(p) \cap |I'_s(q) - I'_s(p)| < t_d} \omega_q I''_s(q), & I'_e(p) = 1 \\ I''_s(p), & I'_e(p) = 0 \end{cases}, \quad (17)$$

式中： $|I_s''(q) - I_s''(p)| < t_d$ 是为了确保邻域像素与目标像素尽可能接近； t_d 为阈值。去噪结果如图 3 所示。

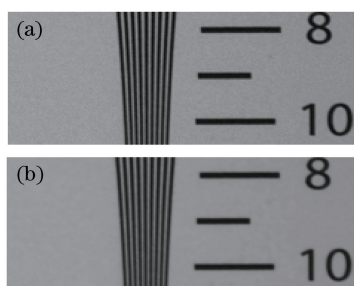


图 3 PFI 去噪前后结果。(a) PFI 去噪前；(b) PFI 去噪后

Fig. 3 Results of PFI denoising.

(a) Before PFI denoising; (b) after PFI denoising

4 实 验

4.1 实验图像获取

本实验采用的液晶透镜是单层向列型圆孔电极结构^[24]，如图 4 所示。液晶层被夹在两块 ITO 玻璃基板之间。ITO 电极层 1 的图形是圆孔状，ITO 电极层 1 与 ZnO 高阻抗膜之间有一层 SiO₂ 绝缘层，其目的是为了防止 ITO 电极 1 与 ZnO 高阻抗膜相互接触。在上电极 1(有圆孔图形)与下电极 2 之间加电压 U_1 和 U_2 时，将在液晶层形成非均匀且轴向对称的电场。当液晶的有效折射率呈现透镜状分布时，液晶器件就相当于只对 e 光调制的透镜。调节电压 U_1 和 U_2 ，液晶透镜可工作于正透镜和负透镜状态。当 $U_1 > U_2$ 时，液晶透镜为正透镜，固定 U_1 通过调节 U_2 改变正焦距。当 $U_1 < U_2$ 时，液晶透镜为负透镜，固定 U_2 通过调节 U_1 改变负焦距。由实验测得液晶透镜特性，所选频率 $f = 800$ Hz，固定电压 $U_1 = 3.5 V_{rms}$ 不变， U_2 从 $1.2 V_{rms}$ 到 $3.1 V_{rms}$ 变化时，液晶透镜光学像差保持在 0.07 之内，光焦度 P 有相对较大的变化范围。图像对比度由评价光学系统参数的调制传递函数 (Modulation transfer function, f_{MT}) 来定义。斜边区域 f_{MT50} (f_{MT50} 表示 f_{MT} 值的一半) 变化如图 5 所示。

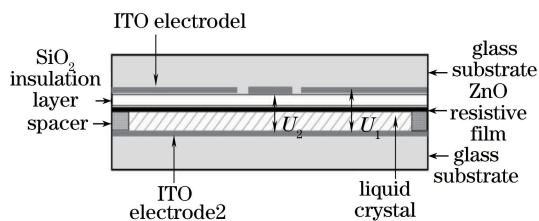


图 4 液晶透镜结构示意图

Fig. 4 Structure of liquid crystal lens

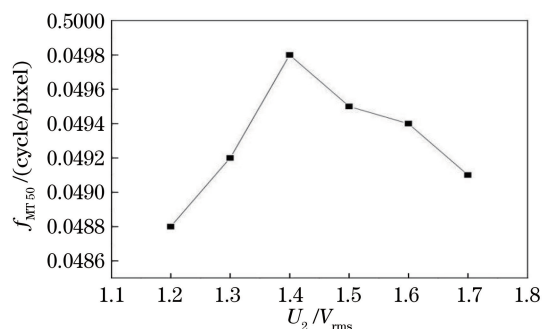


图 5 U_2 改变时 f_{MT50} 变化

Fig. 5 f_{MT50} changing with U_2

越大，图像对比度越高。电压 $U_1 = 3.5 V_{rms}$ ， $U_2 = 1.4 V_{rms}$ 时， f_{MT50} 最大，图像对比度最高。此时认为 $U_1 = 3.5 V_{rms}$ ， $U_2 = 1.4 V_{rms}$ 时为清晰对焦图 I_f ， $U_1 = 3.5 V_{rms}$ ， $U_2 = 3.0 V_{rms}$ 时为参考图 I_r 。实验装置如图 1 所示，将如图 6(a) 所示的 12233 标准板放置在距离液晶透镜视觉成像系统 35 cm 处，获取的图像分辨率为 $2400 \text{ pixel} \times 1800 \text{ pixel}$ 。

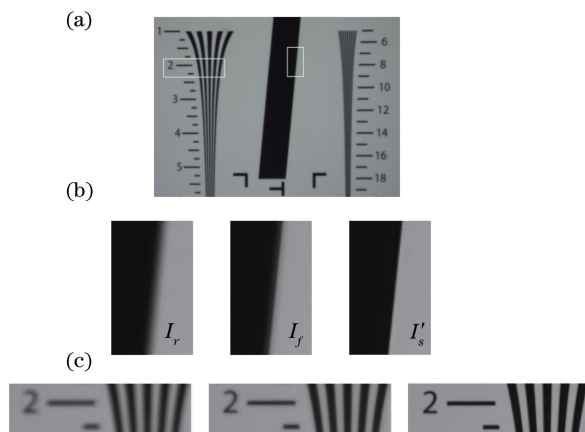


图 6 获取的图像及 PFI 结果。(a) 12233 标准板；(b) 斜边区域： $I_r, I_f, I_s'(\alpha=0.6)$ ；(c) 楔形区域： $I_r, I_f, I_s'(\alpha=0.6)$

Fig. 6 Captured images and illustration of PFI.

(a) ISO12233 chart; (b) slanted bar images of $I_r, I_f, I_s'(\alpha=0.6)$; (c) wedge pattern images of $I_r, I_f, I_s'(\alpha=0.6)$

4.2 实验结果分析

图 6(b) 和 (c) 为实验获得的 I_r, I_f 及针对边缘 PFI 后 $I_s'(\alpha=0.6)$ 的结果。通过计算如图 6(b) 所示区域的 f_{MT50} ，测得 α 不同时对焦图像 I_f 及针对边缘 PFI 后图像 I_s' 的 f_{MT50} 曲线，测量结果如图 7 所示。

从图 7 可知，对图像边缘做 PFI 得到 I_s' 后，测得 I_s' 的 f_{MT50} 相比于对焦图像 I_f 及非对焦图像 I_r 有显著增加。当 $\alpha=0.6$ 时， I_s' 的对比度相比于 I_f 由 0.05 提高到 0.16。图 8 表示随着 α 改变， I_r, I_f, I_s' 的噪声标准差及 I_r, I_s' 去噪后噪声标准差曲线。噪声标

准差测量依据参考文献[25]和[26]。图 8 表明, I_s' 的噪声标准差随着 α 的增大而增大。 I_s' 相比于 I_s 噪声的标准差由 3.93 下降到 2.05, 图像噪声下降了约

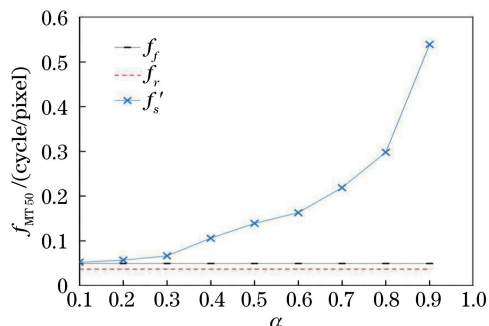


图 7 α 不同时斜边区域 I_r , I_f 及 I_s' 的 f_{MTF50} 曲线

Fig. 7 f_{MTF50} changing with different α for I_r , I_f , I_s'



50%。PFI 处理结果如图 9 所示。去噪后的 I_s' 相比去噪前的 I_s' 噪声标准差由 2.05 下降到 0.36, 图像噪声下降了约 82%。

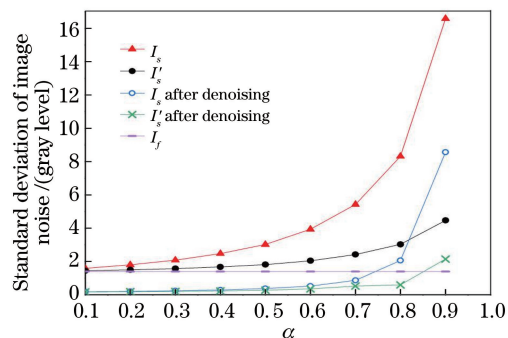


图 8 不同 α 时图像噪声标准差

Fig. 8 Standard deviation of image noise with different α



图 9 PFI 结果。(a) PFI 优化前图像 I_s ($\alpha=0.6$); (b) PFI 优化后图像 I_s' ($\alpha=0.6$)

Fig. 9 Illustration of PFI. (a) I_s ($\alpha=0.6$) without PFI; (b) I_s' ($\alpha=0.6$) with PFI

5 结 论

提出一种优化的无偏振片成像算法。在图像边缘部分利用非对焦图像和对焦图像进行图像处理, 去除由非调制的寻常光带来的低频图像分量。实验证明, 图像对比度随着参数 α 的增大而提高。优化后获得的 I_s' 相比于优化前获得的 I_s , 图像噪声下降了约 50%。边缘对比度相比于对焦图像 I_f 大幅提高。因此, 优化后的算法提高了图像对比度, 同时成功地抑制了噪声。只对 I_s' 的边缘进行去噪处理后, 噪声下降了约 82%, 提高了图像去噪效率。在静态场景下, 一般选择 $\alpha=0.6$ 。如何在不同偏振态的运动场景下调节 α , 将进行进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Berge B, Peseux J. Variable focal lens controlled by an external voltage: an application of electrowetting [J]. The European Physical Journal E, 2000, 3(2): 159-163.
- [2] Hendriks B H W, Kuiper S, van As M A J, et al. Variable liquid lenses for electronic products [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6034: 603402.
- [3] Zhang Y, Zhang X, Shi G W. Applications of liquid lenses in zoom systems [J]. Chinese Optics, 2013, 6(1): 46-56.
张鹰, 张新, 史广维. 液体透镜在变焦系统中的应用 [J]. 中国光学, 2013, 6(1): 46-56.
- [4] Sato S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(9): 1679-1684.
- [5] Ye M, Wang B, Sato S, et al. Liquid-crystal lens with a focal length that is variable in a wide range [J]. Applied Optics, 2004, 43(35): 6407-6412.
- [6] Lin Y H, Ren H, Fan-Chiang K H, et al. Tunable-focus cylindrical liquid crystal lenses [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44(1A): 243-244.
- [7] Yang L, Wang M S, Xu G Q, et al. Design and optimization of low voltage driving variable focal length liquid crystal lens [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0922003.
杨兰, 王敏帅, 徐恭勤, 等. 低电压驱动液晶变焦透镜的设计与优化 [J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0922003.
- [8] Ye M, Wang B, Uchida M, et al. Focus tuning by liquid crystal lens in imaging system [J]. Applied Optics, 2012, 51(31): 7630-7635.
- [9] Ye M, Wang B, Takahashi T, et al. Properties of variable-focus liquid crystal lens and its application in focusing system [J]. Optical Review, 2007, 14(4): 173-175.
- [10] Ye M, Noguchi M, Wang B, et al. Zoom lens system without moving elements realised using liquid crystal lenses [J]. Electronics Letters, 2009, 45(12): 646-648.

- [11] Lin Y H, Chen M S, Lin H C. An electrically tunable optical zoom system using two composite liquid crystal lenses with a large zoom ratio [J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 14-21.
- [12] Li H, Pan F, Wu Y T, *et al.* Depth map sensor based on optical doped lens with multi-walled carbon nanotubes of liquid crystal [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(1): 140-147.
- [13] Li Q C, Yu S D, Chen X X, *et al.* Depth measurement via DFD using liquid crystal lens imaging system [C] // Proceedings of the 78th JSAP Autumn Meeting, Fukuoka, Japan, 2017: 7a-PA3-5.
- [14] Lin Y H, Chen H S, Lin H C, *et al.* Polarizer-free and fast response microlens arrays using polymer-stabilized blue phase liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(11): 113505.
- [15] Li Y, Wu S T. Polarization independent adaptive microlens with a blue-phase liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 8045-8050.
- [16] Lin C H, Wang Y Y, Hsieh C W. Polarization-independent and high-diffraction-efficiency Fresnel lenses based on blue phase liquid crystals [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(4): 502-504.
- [17] Li G Q, Mathine D L, Valley P, *et al.* Switchable electro-optic diffractive lens with high efficiency for ophthalmic applications [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(16): 6100-6104.
- [18] Ye M, Sato S. Liquid crystal lens with insulator layers for focusing light waves of arbitrary polarizations [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, 42(10): 6439-6440.
- [19] Ren H W, Lin Y H, Wu S T. Polarization-independent and fast-response phase modulators using double-layered liquid crystal gels [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(6): 061123.
- [20] Bao R, Cui C H, Yu S D, *et al.* Polarizer-free imaging of liquid crystal lens [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19824-19830.
- [21] Cui C H, Bao R, Yu S D, *et al.* Polarizer-free imaging using reference image for liquid crystal lens [J]. *Optics Communications*, 2015, 342: 214-217.
- [22] Cui C H, Bao R, Yu S D, *et al.* Denoising for polarizer-free imaging of liquid crystal lens [J]. *Society for Information Display Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, 46(1): 262-265.
- [23] Song R, Zhang H X, Wu Y B, *et al.* Image edge detection algorithm for laser active imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 081007.
宋睿, 张合新, 吴玉彬, 等. 激光主动成像图像边缘检测算法研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 081007.
- [24] Ye M, Wang B, Uchida M, *et al.* Low-voltage-driving liquid crystal lens [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(10): 100204.
- [25] Liu X H, Tanaka M, Okutomi M. Noise level estimation using weak textured patches of a single noisy image [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, Orlando, FL, USA. New York: IEEE, 2013, 8556: 665-668.
- [26] Rank K, Lendl M, Unbehauen R. Estimation of image noise variance [C] // Proceedings of IEE Conference on Vision, Image and Signal Processing, London: IET, 2002, 146(2): 80-84.